

УДК 621.91

В.Е. ЗАЙЦЕВ, Е.А. СКРИПКА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6082 Т6

Сделан анализ требований, предъявляемых к корпусным деталям летательных аппаратов. Рассмотрены вопросы торцевого фрезерования при высокоскоростной механической обработке корпусных деталей из алюминиевого сплава 6082 Т6. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных с целью определения, при каких значениях основных параметров режимов резания (скорости, подачи на зуб, ширины и глубины резания) получают наиболее рациональные значения крутящего момента. Разработана математическая модель, позволяющая заранее определить величину крутящего момента.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, корпусные детали, алюминиевые сплавы, статистический анализ, математическая модель, крутящий момент.

Роль корпусных деталей авиационных агрегатов в современном авиастроении

В технологии авиастроения повышенное внимание уделяется изготовлению корпусных деталей агрегатов авиационных систем. Это связано с тем, что от деталей этого класса во многом зависят качество, надежность, экономичность и долговечность выпускаемых технических изделий летательных аппаратов.

Конструктивное исполнение корпусных деталей, применяемый материал и необходимые параметры точности определяют исходя из служебного назначения деталей, требований к работе механизмов и условий их эксплуатации. При этом учитывают также технологические факторы, связанные с возможностью получения требуемой конфигурации заготовки, возможностями механической обработки, и удобства сборки.

Постановка задачи

Механическая обработка корпусных заготовок сводится главным образом к обработке плоскостей и отверстий, поэтому обработка плоскости и торцов отверстий по возможности должна выполняться на проход, для чего плоскости и торцы не должны иметь выступов; торцам отверстий необходимо придать удобную форму для обработки торцевой фрезой.

Широко применимы в авиастроении при изготовлении корпусных деталей алюминиевые сплавы, что позволяет значительно снизить массу деталей,

при этом несколько не ухудшаются физико-механические характеристики по сравнению с другими сплавами.

При обработке корпусных деталей чаще используется обработка от плоскости (базирование более простое и удобное), однако более точным является обработка от отверстия, особенно при наличии в корпусах точных отверстий больших размеров и при высокой точности расстояния от плоскости до основного отверстия.

При механической обработке корпусных деталей из алюминиевых сплавов возникает целый ряд проблем, которые необходимо решать на производстве.

Высокоскоростная обработка резанием

Обработка резанием является основным, наиболее используемым в промышленности процессом размерной обработки деталей. Процесс изготовления деталей со сложными поверхностями на этапе технологической подготовки производства является очень трудоёмким. Сокращение времени цикла механической обработки таких деталей требует применения более эффективных и прогрессивных технологий. Одним из возможных решений является применение высокоскоростной обработки и в частности высокоскоростного фрезерования.

Существующая в настоящее время возможность фрезерования алюминия с более высокими скоростями позволила заменить в аэрокосмической промышленности многие дорогостоящие в обработке достаточно короткие корпусные детали более

экономичными цельными и длинномерными, имеющими сложную конструкцию и выполняемыми из цельных алюминиевых заготовок [1]. Во многих случаях оказывается более выгодным 90 % или более заготовки перевести в стружку, сделав одну деталь, чем делать их несколько по отдельности. Вот почему так необходима высокая производительность съема металла.

Экспериментальное изучение вопросов торцевого фрезерования алюминиевого сплава 6082 Т6

1. Основные свойства и характеристики сплава 6082

Алюминиевый сплав 6082 относится к сплавам серии 6000 (система Al – Mg – Si) и является термически упрочняемым. Он обладает хорошей коррозионной стойкостью, технологичностью в металлургическом и машиностроительном производстве.

Высокая пластичность в горячем состоянии позволяет изготавливать сложные по конфигурации полуфабрикаты и заготовки для корпусных деталей летательных аппаратов. Высокую пластичность сплавы имеют в отожженном, свежезакаленном и естественно состаренном состоянии, что позволяет подвергать их штамповке, вытяжке и другим операциям со значительными степенями деформации.

Алюминиевый сплав 6082 обладает средней прочностью и высокой коррозионной стойкостью. Этот сплав используется в качестве «базового», т.к. обладает самой высокой прочностью среди сплавов серии 6000 [2].

Наиболее высоким показателем обрабатываемости (качество обработанной поверхности; стойкость режущего инструмента; силы, возникающие при резании; допустимая скорость механической обработки; тип стружки; условия ее отвода из зоны резания и т.п.), обладает сплав 6082 Т6.

2. Особенности торцевого фрезерования

Одной из наиболее распространенных операций обработки корпусов ЛА является торцевое фрезерование.

Это довольно часто встречающийся тип фрезерной операции, выполняемой торцево-цилиндрическими и концевыми фрезами. При небольшой высоте уступа возможна обработка с большой радиальной глубиной резания.

К этому виду обработки относят уступы тонкостенных деталей (рис. 1, а), невысокие уступы (рис. 1, б), высокие и глубокие уступы (рис. 1, в, г).

В случае торцевого фрезерования обработка ведется торцевой и периферийной частью фрезы одновременно на двух поверхностях.

При высокоскоростном фрезеровании одним из основных параметров, определяющих окончательное качество изделия, затраты на производство и, соответственно, его цену, является крутящий момент. Нестабильность его величины влияет на такие величины, как потребная мощность станка, силы резания, скорость вращения шпинделя, срок службы инструмента, которые в свою очередь влияют на точность обработки (например, возникновение вибраций, ухудшающих качество поверхности) и производительность труда.

3. Планирование и описание эксперимента

Экспериментальная установка моделирует заданный технологический процесс резания в заданных условиях и выдает информацию о параметрах процесса в удобном виде. Экспериментальная установка состоит из режущего устройства и измерительной системы. В нашем случае мы имеем универсальную экспериментальную установку, предназначенную для исследования зависимости таких

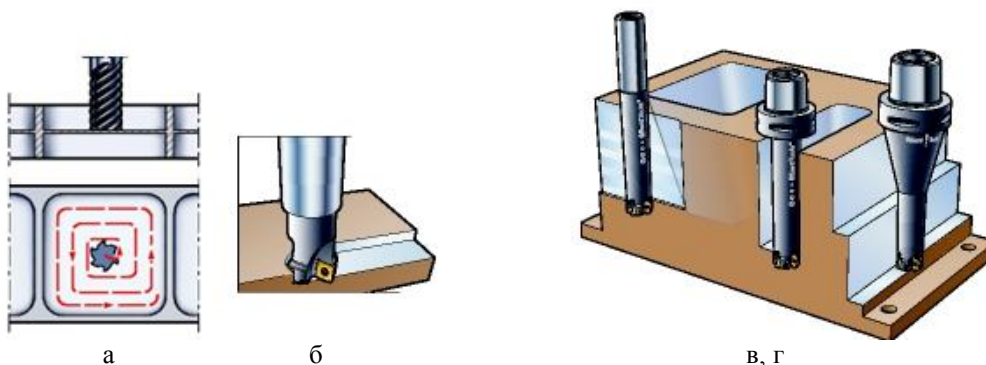


Рис. 1. Виды торцевого фрезерования уступов

выходных характеристик процесса, как величина крутящего момента (Н·м), тока (А), скорости подачи (мм/мин), скорости вращения шпинделя (об/мин) в зависимости от технологических параметров процесса высокоскоростного фрезерования (скорости резания 'B, cutting speed', подачи на зуб 'A, feed per tooth', ширины 'C, depth of cut' и глубины резания 'D, width of cut'). Также данные эксперимента позволяют измерить величины шероховатостей поверхностей Ra, Rz, Rq ('roughness').

Блок схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Экспериментальная установка состоит из:

– обрабатывающего центра фирмы Deckel – Maho DMU 60T;

– заготовки – алюминиевого блока с размерами 100×100×45 мм;

– режущий инструмент – фреза диаметром 63 мм (серия M680 компании WIDIA) с пятью сменными режущими пластинками из углеродистой стали (ХРНТ 160412 Al);

– профилометр Surftest SJ-400.

В нашем случае выходные параметры зависят от четырех факторов, каждый из которых варьируется на двух уровнях (-1, 1). Эксперимент является многофакторным.

4. Исследование влияния основных параметров резания на величину крутящего момента при торцевом фрезеровании сплава 6082 T6

Для постулирования модели исследуемого процесса применялся метод ANOVA – метод в математической статистике, направленный на поиск зависимостей в экспериментальных данных путем исследования значимости различий в средних значениях.

На рис. 3 приведено распределение значений, возможные значимые факторы и взаимодействия между ними.

Наиболее значимыми взаимодействиями между факторами являются A:B, B:C, B:D. Взаимодействия A:C, A:D не влияют на значение выходного параметра, также не влияет и взаимодействие между факторами C:D. Т.е. крутящий момент находится под влиянием таких параметров, как скорость резания – подача на зуб, скорость – глубина резания, скорость – ширина резания, и наименьшее значение крутящего момента может быть получено с увеличением скорости фрезерования и уменьшением подачи на зуб; с увеличением скорости фрезерования при наименьших значениях ширины и глубины резания.

Для сравнения распределений между несколькими параметрами (факторами) используем «ящичковые» диаграммы (рис. 4).

Из рис. 4 можно сделать вывод о нормальном распределении экспериментальных значений, что позволяет начать анализ предлагаемой модели методом ANOVA.

Предложенное отношение между откликом «крутящий момент» и факторами может быть представлено в следующем виде (1):

$$Y^{0,5} = \beta_0 + \beta_A \cdot A + \beta_B \cdot B + \beta_C \cdot C + \beta_D \cdot D + \beta_{AB} \cdot AB + \beta_{BC} \cdot BC + \beta_{BD} \cdot BD, \quad (1)$$

где $\beta_0, \beta_A, \beta_B, \beta_C, \beta_D, \beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{BD}$ – параметры модели.

Выбор модели для полученного набора данных основывается на результатах F – теста (критерия Фишера). Основным показателем в данном случае является p – значение – величина, показывающая

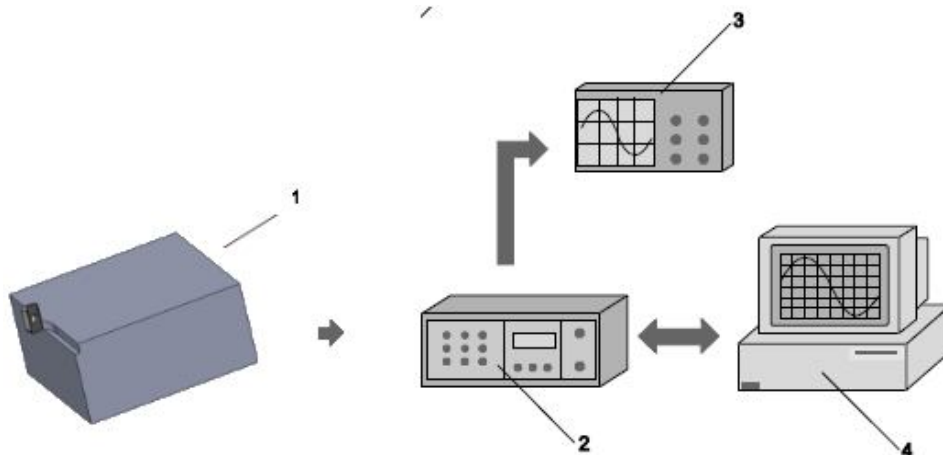


Рис. 2. Блок схема экспериментальной установки:
1 – исследуемый процесс; 2 – усилитель АЦП (аналого-цифрового преобразователя);
3 – осциллограф; 4 – система управления (компьютер)

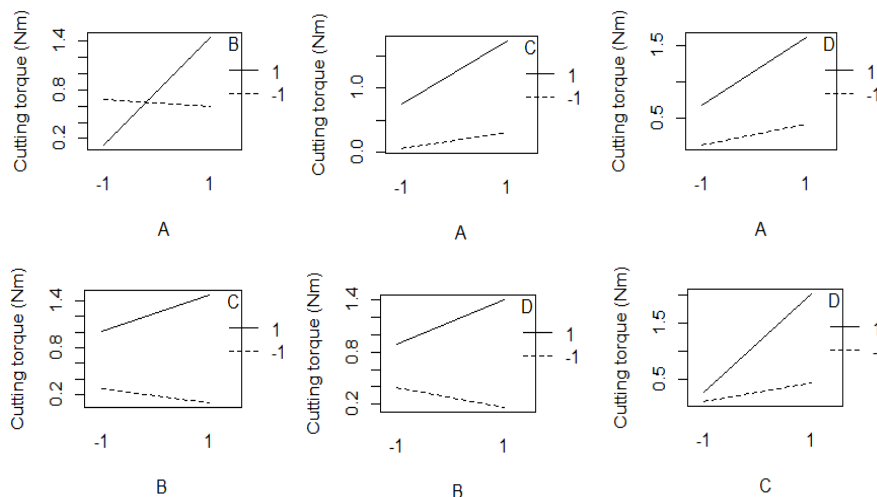


Рис. 3. Диаграмма взаимодействий между факторами: cutting torque – крутящий момент, А – подача на зуб, мм/зуб; В – скорость резания, м/мин, С – глубина резания, мм; D – ширина резания, мм

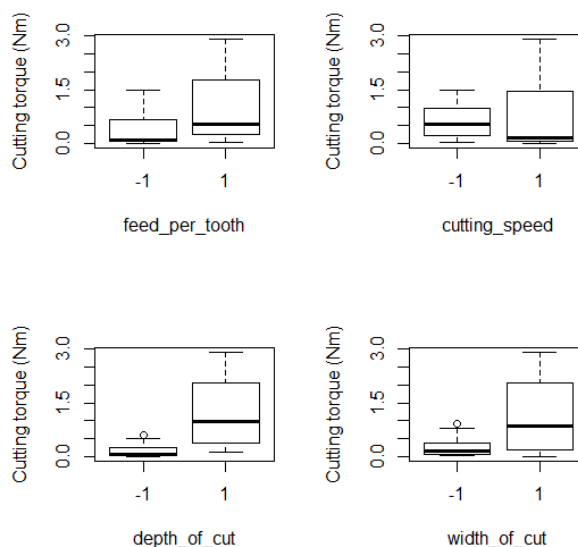


Рис. 4. Ящичковые диаграммы: cutting torque – крутящий момент (Нм); feed per tooth – подача (мм/зуб); cutting speed – скорость резания (м/мин); depth of cut – глубина резания (мм); width of cut – ширина резания (мм)

вероятность ошибки при отклонении от нулевой гипотезы (ошибки первого рода). Маленькая величина p – значения показывает, что добавленные определения улучшают (уточняют) модель исследуемого процесса. Наименьшая величина указывает на то, что любое изменение случайной величины оказывает большое влияние на исследуемый отклик.

Результаты ANOVA анализа представлены на рисунке 5.

Как мы видим, p – значение модели меньше, чем $2,2 \cdot 10^{-6}$ и R – значение (коэффициент корреляции) равен 97,5 %. Таким образом, предложенная модель является точной на 97,5 %.

На рисунке 6 изображены результаты сравне-

ния полученных данных с согласованным нормальным распределением. Хорошо видно, что наиболее значимыми переменными являются факторы А, В и взаимодействия между А:В, В:С, В:D (подача и скорость резания, скорость и глубина резания, скорость и ширина резания).

Согласно полученным результатам уравнение модели имеет следующий вид (2):

$$\begin{aligned}
 Y^{0,5} = & 4,175 - 1,504 \cdot 10^1 \cdot A - 7,739 \cdot 10^{-3} \cdot B - \\
 & - 9,483 \cdot 10^{-2} \cdot C - 1,513 \cdot 10^{-1} \cdot D + \\
 & + 2,803 \cdot 10^{-2} \cdot AB + 4,057 \cdot 10^{-4} \cdot BC + \\
 & + 6,032 \cdot 10^{-4} \cdot BD.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

```
lm(formula = output^0.5 ~ Feed_per_tooth + Cutting_speed + Depth_of_cut +
  Width_of_cut + Feed_per_tooth:Cutting_speed + Cutting_speed:Depth_of_cut +
  Cutting_speed:Width_of_cut, data = dm)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.135734 -0.046166 -0.000183  0.059106  0.124602

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    4.175e+00  4.002e-01  10.433 2.13e-10 ***
Feed_per_tooth -1.504e+01  1.498e+00 -10.042 4.53e-10 ***
Cutting_speed  -7.739e-03  6.358e-04 -12.174 9.28e-12 ***
Depth_of_cut   -9.483e-02  5.616e-02  -1.689 0.104258
Width_of_cut   -1.513e-01  1.123e-01  -1.347 0.190505
Feed_per_tooth:Cutting_speed  2.803e-02  2.379e-03  11.782 1.83e-11 ***
Cutting_speed:Depth_of_cut   4.057e-04  8.922e-05  4.548 0.000131 ***
Cutting_speed:Width_of_cut   6.032e-04  1.784e-04  3.380 0.002474 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0757 on 24 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9807,    Adjusted R-squared:  0.975
F-statistic: 173.8 on 7 and 24 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Рис. 5. Результаты анализа ANOVA

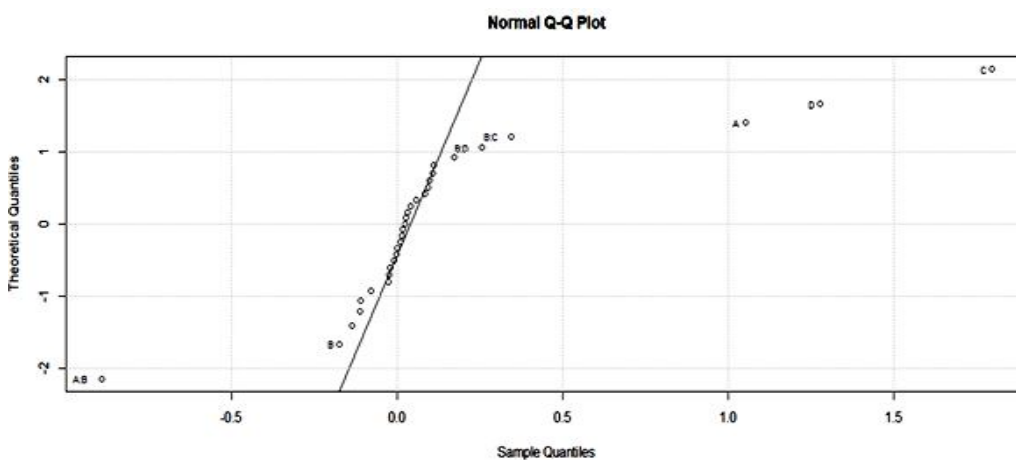


Рис. 6. Диаграмма «квантиль – квантиль»

Проверка адекватности уравнения регрессии (модели) осуществлялась с помощью средней ошибки аппроксимации, величина которой не должна превышать 10...12 %. Для модели, приведенной в настоящей статье, значения критерия Шапиро – Уилка равно 0,5741, что является достаточным для подтверждения адекватности модели с откликом «крутящий момент».

Для оценки экспериментальных ошибок воспользуемся графическим изображением остаточных погрешностей. На рисунках 7 и 8 хорошо видно нормальное распределение остаточных погрешностей независимых переменных. Это подтверждает, что предложенная модель может быть постулирована с целью предсказания величины крутящего момента.

Для рассматриваемой модели на рисунке 9 представлены контурные графики. С их помощью мы можем определить значения независимых величин, при которых отклик «крутящий момент» будет постоянным.

На рисунке 10 представлены найденные взаимоотношения между откликом и параметрами про-

цесса, влияющими на его величину.

Заключение

Как видно на рисунках 9 и 10, стабильное значение отклика может быть достигнуто при значении подачи $f_z = 0,12...0,14$ мм/зуб в диапазоне скоростей 550 ... 700 м/мин (плот А). Также мы можем утверждать, что любые изменения глубины резания и подачи на зуб (плот В) не позволяют получить стабильный крутящий момент (наименьшее его значение может быть достигнуто при минимальных величинах обоих факторов). Аналогичные выводы можно сделать для плотов С, D, E, F – любое изменение величины этих независимых переменных не позволяет стабилизировать крутящий момент.

Как показал проведенный эксперимент, стабильное значение величины крутящего момента может быть получено при увеличении скорости резания и снижении подачи на зуб, также при увеличении значения скорости и снижении ширины и глубины резания.

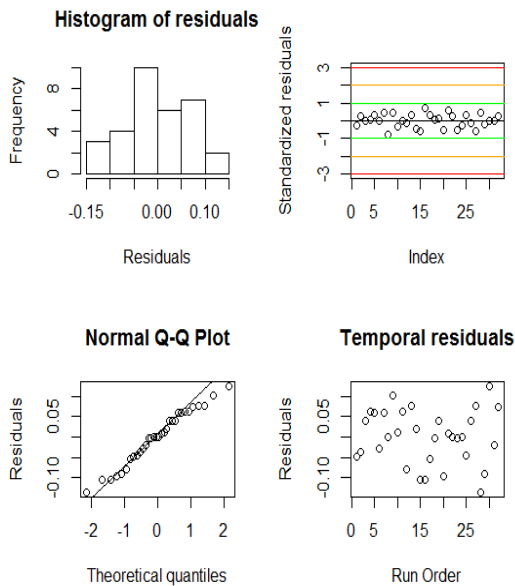


Рис. 7. Результаты проверки модели на адекватность:
 frequency – частота;
 residuals – остаточные погрешности;
 standartized residuals – стандартные погрешности;
 theoretical quantities – теоретические величины;
 run order – порядковый номер

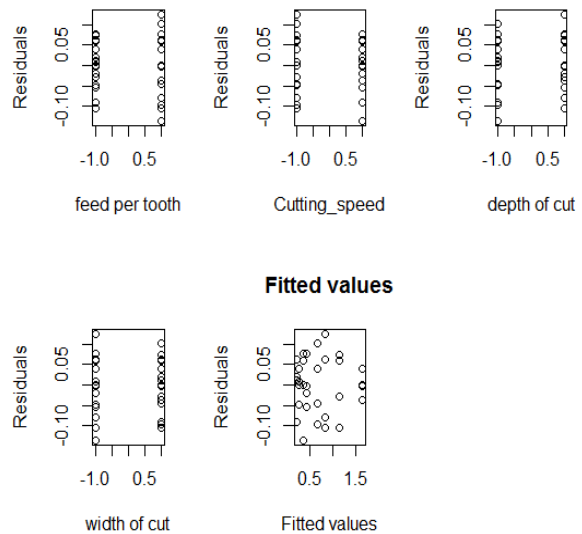


Рис. 8. Остаточные погрешности независимых переменных

Литература

1. Макаров, А.И. Особенности технологических процессов высокоскоростного фрезерования сложных поверхностей. [Электронный ресурс] / А.И. Макаров // *Материалы 65-ой Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров"* Меж-

дународного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Книга 7. – Москва, МГТУ «МАМИ», 2009. – С. 147–149. – Режим доступа: http://www.mami.ru/science/autotr2009/scientific/article/s07/s07_27.pdf. – 1.09.2013.

2. *Алюминий и алюминиевые сплавы. Обработка алюминия* [Электронный ресурс]/ *Материалы сайта «Точмех»*. Режим доступа: <http://www.tochmeh.ru/info/alum.php>. – 1.09.2013.

Поступила в редакцию 3.10.2008, рассмотрена на редколлегии 9.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектирования ракетно-космических аппаратов В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЗАННЯ НА ВЕЛИЧИНУ КРУТНОГО МОМЕНТУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ 6082 Т6

В.Є. Зайцев, К.А. Скряпка

Зроблено аналіз вимог, що застосовуються до корпусних деталей літальних апаратів. Розглянуто питання торцевого фрезерування при високошвидкісній механічній обробці корпусних деталей з алюмінієвого сплаву 6082 Т6. Проведено статистичну обробку експериментальних даних з метою визначення, при яких значеннях основних параметрів режимів різання (швидкості, подачі на зуб, ширини і глибини різання) виходять найбільш раціональні значення крутного моменту. Розроблено математичну модель, що дозволяє заздалегідь визначити величину крутного моменту.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, корпусні деталі, алюмінієві сплави, статистичний аналіз, математична модель, крутний момент.

INVESTIGATION OF THE CUT MAIN PARAMETERS INFLUENCE TO TORQUE VALUE OF ALUMINUM ALLOY 6082 T6 MILLING

V.E. Zaitsev, K.A. Skrypka

The analysis of the requirements of body parts flying machines. The problems in high-speed end milling machining parts made from aluminum alloy 6082 T6. Statistical processing of the experimental data in order to deter-

mine for which values of the main parameters of cutting conditions (speed, feed per tooth, the width and cut depth) are obtained by the most rational of torque values. A mathematical model, which allows to determine the value of torque.

Key words: high-speed milling, body parts, aluminum alloys, statistical analysis, torque mathematical model.

Зайцев Виталий Егорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии производства летательных аппаратов, проректор по научно-педагогической работе, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vitaliy.zaytsev@khai.edu.

Скрипка Екатерина Андреевна – магистр кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kateeckpruna@gmail.com.

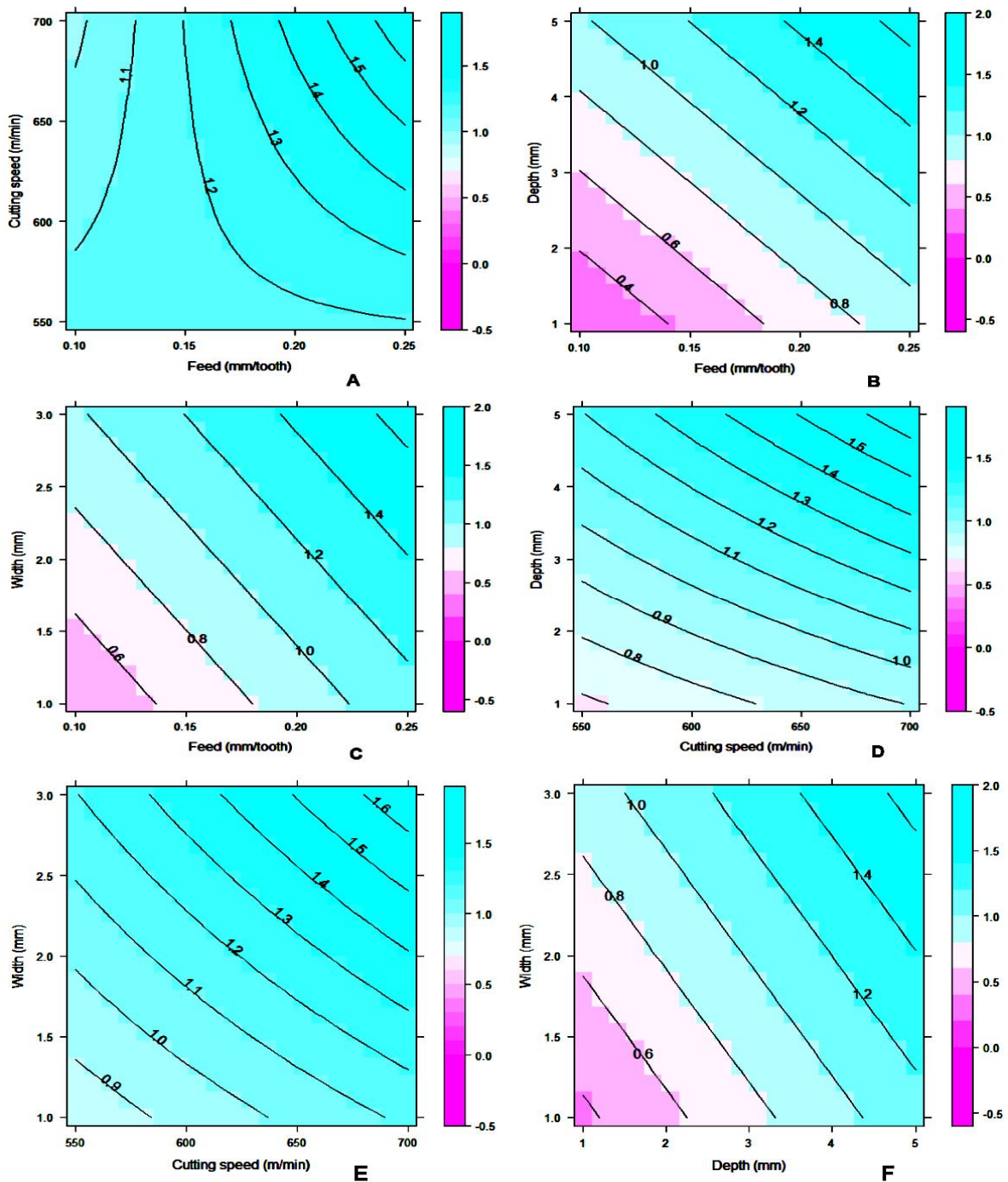
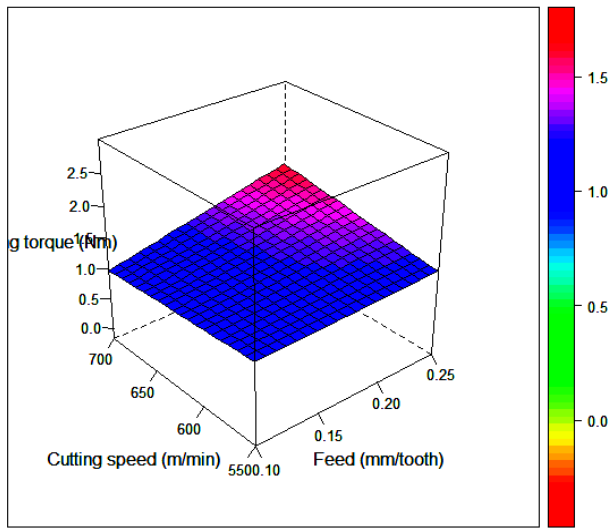
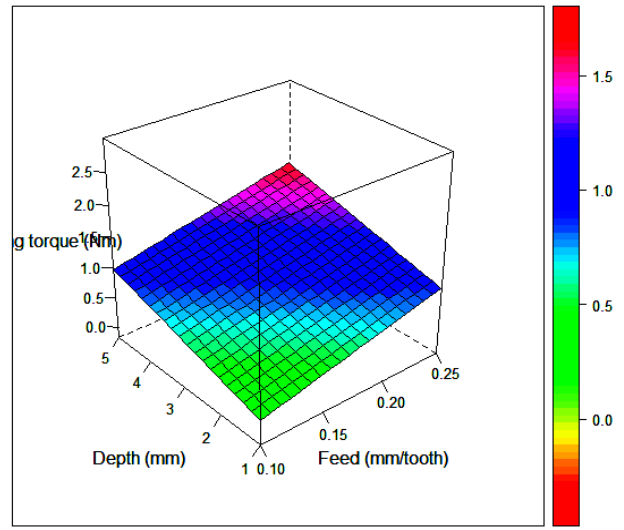


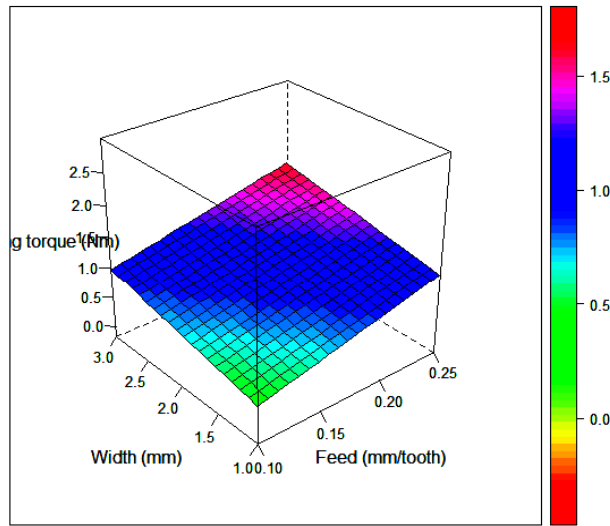
Рис. 9. Контурные диаграммы



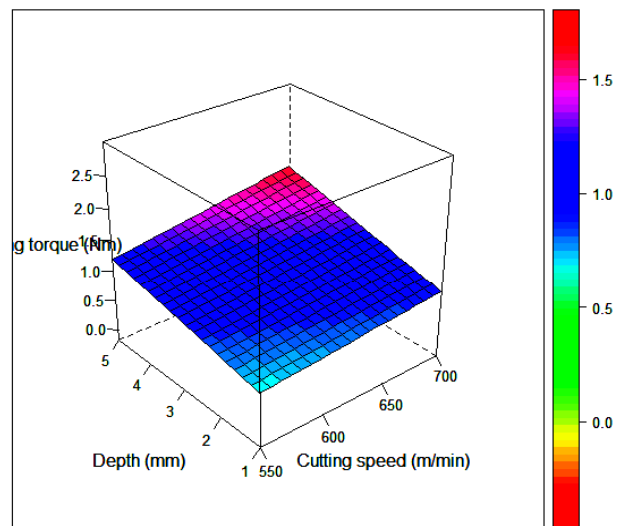
A



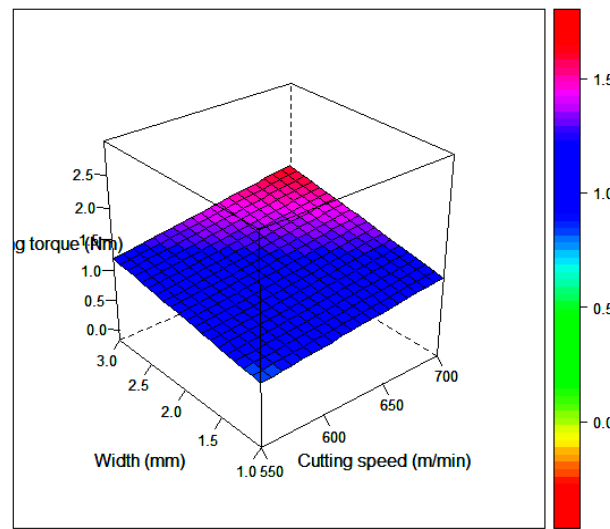
B



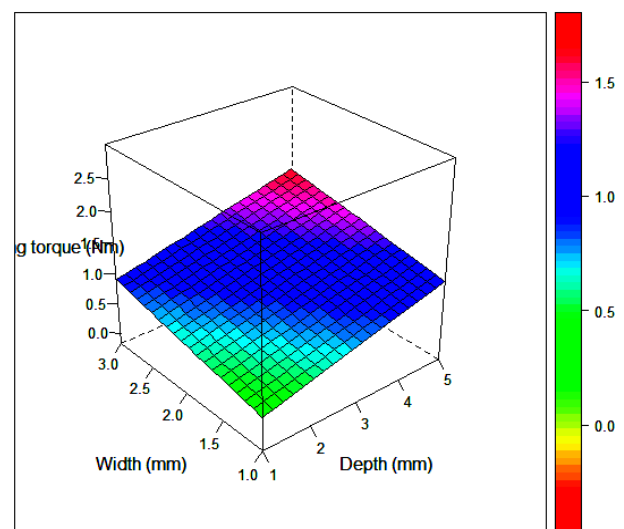
C



D



E



F

Рис. 10. 3-D диаграммы поверхностей отклика